

На правах рукописи

Тихомиров Илья Сергеевич

**КОМПЛЕКС ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА С УЛУЧШЕННЫМИ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ**

Специальность: 05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2009

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете им. В.И. Ульянова (Ленина)

Научный руководитель - заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор Александр Сергеевич Васильев

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, ст.н.с. Безменов Феликс Васильевич  
кандидат технических наук, доцент Томасов Валентин Сергеевич

Ведущее предприятие – ОАО «Российский институт мощного радиостроения» (ОАО «РИМР»), г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2009 года в \_\_\_\_\_ на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.05 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу 197376, Санкт-Петербург, ул. проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2009 года

Ученый секретарь совета по защите  
докторских и кандидатских диссертаций

М.П. Белов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Технологии, использующие индукционный нагрев металлов, широко применяются во многих отраслях промышленности, как в нашей стране, так и за рубежом. К таким технологиям можно отнести пайку, сварку, закалку, высокочастотную металлизацию, горячую посадку, съем машиностроительных деталей, нагрев металла перед пластической деформацией и многие другие. Независимо от технологий проблемы повышения энергетических показателей и эффективности применения являются общими для всех комплексов индукционного нагрева.

Новые решения в области преобразовательной транзисторной техники позволяют существенно повысить энергетические показатели электротехнологических комплексов индукционного нагрева, но требуют разработки новых алгоритмов управления, обеспечивающих оптимальное взаимодействие составляющих элементов комплекса. Решение этих задач открывают широкие возможности модернизации процессов термообработки металлов на машиностроительных предприятиях России.

Актуальность диссертационной работы обусловлена насущными потребностями промышленности в усовершенствовании морально и физически устаревших комплексов индукционного нагрева металлов.

Цель настоящей работы. Разработка структуры и алгоритмов управления, направленных на улучшение энергетических показателей комплекса индукционного нагрева.

Для достижения указанной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Разработка оптимальной структуры комплекса индукционного нагрева с улучшенными энергетическими показателями.
2. Разработка адаптивного алгоритма оптимального согласующего управления комплексом индукционного нагрева, направленного на повышение КПД и минимизацию реактивной мощности обмена между элементами комплекса.
3. Разработка и исследование компьютерной модели комплекса индукционного нагрева и настройка параметров алгоритма управления.
4. Разработка физической модели комплекса индукционного нагрева с улучшенными энергетическими показателями и экспериментальная оценка его эффективности в условиях реальных возмущений.

Методы исследования. При разработке теоретических положений диссертационной работы применялось численное моделирование и экспериментальные исследования на макете комплекса индукционного нагрева.

Научная новизна и значимость работы состоит в следующем:

1. В структуру комплекса индукционного нагрева включен блок оптимального согласующего управления, который минимизирует обмен реактивной мощностью между элементами комплекса и поддерживает

оптимальный режим высокочастотного преобразования при изменении параметров индукционной системы.

2. Предложен новый алгоритм управления, построенный на основе самовозбуждения с адаптацией параметров к изменению режима работы нагревательного комплекса.

3. Компьютерная модель разработана с учетом взаимосвязей всех элементов комплекса индукционного нагрева и влияния управляющих воздействий на энергетические показатели, что позволяет выполнять настройку параметров нового алгоритма управления в различных динамических и установившихся режимах, характерных для индукционного нагрева.

4. Физическое моделирование комплекса индукционного нагрева выполнено на уровне мощности 100 кВт в частотном диапазоне 30...100 кГц, что позволило оценить эффективность и помехоустойчивость комплекса в условиях реальных возмущений со стороны питающей сети и индукционной нагрузки, подтвердило его работоспособность и высокую эффективность.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Структура комплекса индукционного нагрева с блоком согласующего управления.

2. Адаптивный алгоритм оптимального согласующего управления комплексом индукционного нагрева, обеспечивающий повышение КПД и минимизацию реактивной мощности обмена между элементами комплекса при переменных параметрах индукционной системы.

3. Компьютерная модель, адекватно описывающая динамические и установившиеся режимы комплекса индукционного нагрева.

4. Физическая модель комплекса индукционного нагрева с новым адаптивным алгоритмом управления и оценка его эффективности в условиях реальных возмущений со стороны индукционной нагрузки и питающей сети.

Практическая значимость полученных в диссертационной работе результатов заключается в следующем:

1. Введение оптимального согласующего управления в структуру комплекса индукционного нагрева позволяет существенно снизить себестоимость термообработки токами высокой частоты машиностроительных деталей за счет экономии электроэнергии и снижения установленной мощности оборудования.

2. Адаптивный алгоритм оптимального согласующего управления позволит поднять верхнюю границу диапазона частотного преобразования транзисторных инверторов в составе комплексов индукционного нагрева, что даст большой экономический эффект при замене ламповых генераторов в промышленности.

3. Разработанная компьютерная модель имеет самостоятельную практическую ценность, так как позволяет выполнять настройку параметров нового алгоритма управления с учетом характерных особенностей конкретных технологий индукционного нагрева.

4. Физическая модель комплекса индукционного нагрева мощностью 100 кВт может служить прототипом промышленных комплексов нового поколения для термообработки машиностроительных деталей токами высокой частоты.

Внедрение результатов. Разработанный комплекс индукционного нагрева успешно прошел испытания в межотраслевой лаборатории «Современные электротехнологии» (МОЛ СЭТ) СПбГЭТУ и ООО «ИНТЕРМ».

Апробация работы. Основные положения и научные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах и научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава МОЛ СЭТ СПбГЭТУ 2006-08 гг.

Публикации по теме диссертации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 8 статьях, среди которых 2 публикации в рецензируемом издании, рекомендованном в перечне ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами и заключения. Она изложена на 115 страницах машинописного текста, включает 61 рисунок и содержит список литературы из 63 наименований, среди которых 54 отечественных и 9 иностранных авторов.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе дано описание наиболее распространенных технологических процессов с использованием индукционного нагрева, а также требуемые для них частотные диапазоны и уровни мощности. Рассмотрены особенности индукционной нагрузки, представлены структурные схемы современных промышленных комплексов индукционного нагрева.

На рис.1 представлена структура комплекса индукционного нагрева, включающая неуправляемый выпрямитель (В), мостовой инвертор напряжения (ИН), блок согласования с последовательной компенсацией реактивной мощности (БС), индукционную систему (ИС) и систему управления (СУ). Система управления обеспечивает регулирование выходных параметров – мощности, тока, напряжения на индукторе, температуры нагрева – за счет изменения частоты выходного напряжения инвертора. К достоинствам такой структуры можно отнести отсутствие регулируемого выпрямителя, это упрощает силовую схему и систему управления комплексом нагрева. Существенным недостатком является увеличение коммутационных потерь в инверторе при отклонении параметров индукционной системы от номинальных, например, при нагреве магнитных

деталей выше точки Кюри. Инвертор нагружается реактивным током, увеличивается ток, на котором осуществляется коммутация транзисторных ключей. Это приводит к снижению КПД, перегреву ключевых элементов, уменьшению выходной мощности, ограничению верхней границы частотного диапазона.

На рис.2 представлена структура комплекса индукционного нагрева, включающая неуправляемый выпрямитель (В), регулятор выпрямленного напряжения (ШИМ), мостовой инвертор тока (ИТ), блок согласования с параллельной компенсацией реактивной мощности (БС), индукционную систему (ИС) и систему управления (СУ). Система управления обеспечивает регулирование выходных параметров путем изменения напряжения питания инвертора и согласует частоту работы инвертора с частотой нагрузочного контура, поддерживая резонансный режим работы либо путем фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), либо в режиме самовозбуждения.

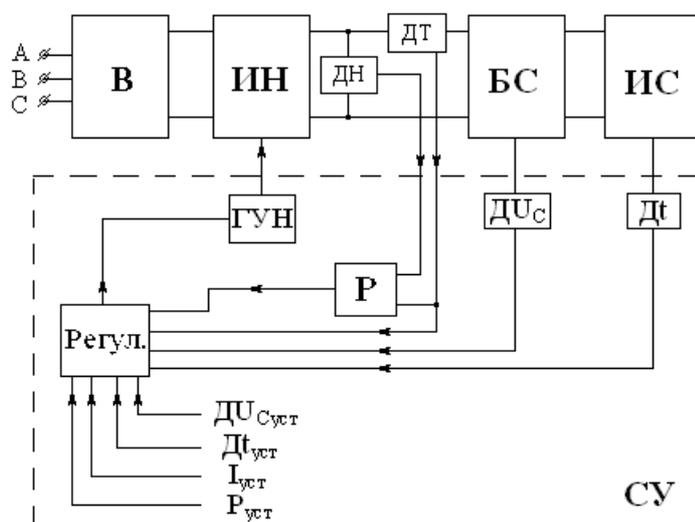


Рис. 1. Структура комплекса индукционного нагрева с частотным регулированием выходных параметров

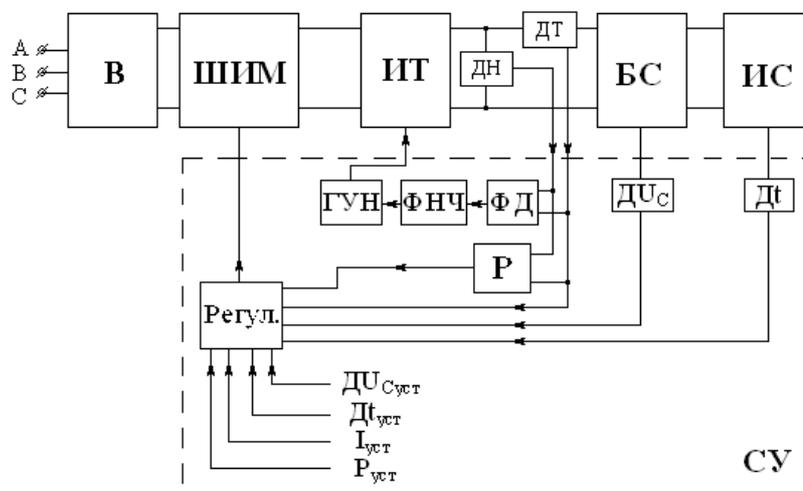


Рис. 2. Структура комплекса индукционного нагрева с фазовой автоподстройкой частоты и ШИМ - регулированием выходных параметров

Достоинством такой системы является оптимальная работа инвертора – коммутационные потери минимальны во всем диапазоне изменения параметров индукционной системы, а ключи нагружены только активным током. Существенным недостатком является ограничение длины высокочастотного кабеля, соединяющего инвертор с нагревательным устройством. Паразитная индуктивность этого кабеля ухудшает коммутационные процессы силовых транзисторов инверторного моста и тем самым снижает эффективность его работы. Это ограничивает применение инвертора тока в комплексах индукционного нагрева с выносным блоком согласования, которые необходимы во многих индукционных технологиях.

В работе предлагается новая структура индукционного нагревательного комплекса (рис. 3) с инвертором напряжения и согласующим управлением на основе самовозбуждения, лишенная этих недостатков и ограничений.

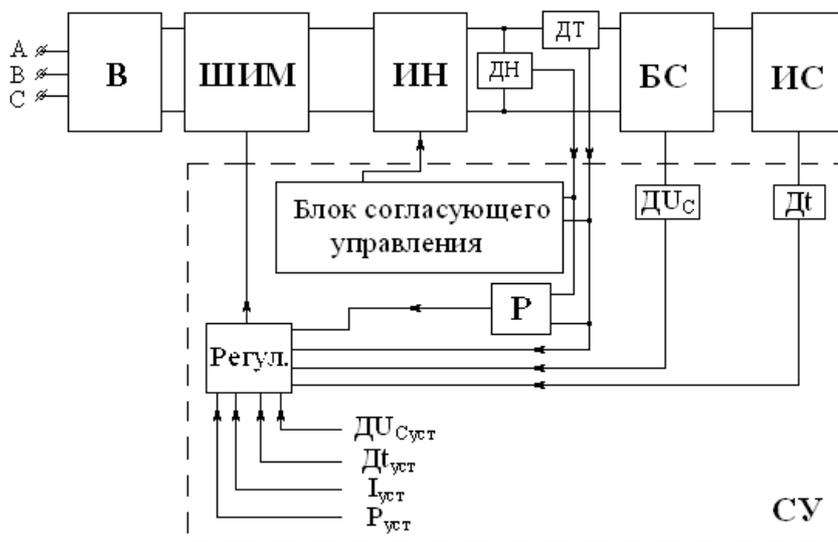


Рис. 3. Структура комплекса индукционного нагрева с согласующим управлением и ШИМ - регулированием выходных параметров

При такой структуре система управления должна не только постоянно согласовывать частоту работы инвертора с частотой нагрузочного контура, но и автоматически устанавливать оптимальный фазовый сдвиг между выходным током и напряжением инвертора на уровне, который задает система слежения за качеством коммутационных процессов силовых транзисторов инвертора напряжения. Классическим способом обеспечения резонансного режима работы инвертора является система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), однако она имеет в своей структуре фильтр низких частот, который уменьшает быстродействие системы и требует увеличения запаса фазового рассогласования, необходимого для надежной индуктивной коммутации транзисторов в динамических режимах. Это снижает предельно достижимую частоту работы и КПД инвертора, поэтому в предлагаемом алгоритме согласующего управления использован принцип самовозбуждения, который может обеспечить генерацию импульсов

управления с оптимальным фазовым сдвигом между выходным током и напряжением транзисторного инвертора напряжения на каждом периоде.

Вторая глава посвящена разработке адаптивного алгоритма согласующего управления на основе самовозбуждения, направленного на минимизацию потерь в инверторе напряжения.

Рассмотрены коммутационные процессы в транзисторном инверторе напряжения (рис. 4) и определены оптимальные моменты для коммутации ключей с минимальными потерями. В инверторе напряжения коммутация транзисторов начинается с выключения пары транзисторов одной диагонали моста (например, X1 и X4), после чего с некоторой задержкой (мертвое время) включается пара транзисторов другой диагонали (X2 и X3).

При работе с емкостным рассогласованием (частота работы инвертора меньше собственной частоты нагрузочного контура) выключение транзисторов проходит без потерь, так как в это время уже проводят их встречные диоды. Включение другой пары транзисторов сопровождается большими потерями во всех транзисторах моста, это связано с тем, что источник, питающий инвертор, на короткое время оказывается замкнутым из-за тока обратного восстановления антипараллельных диодов силовых транзисторов. Режим работы транзисторного инвертора напряжения с емкостным рассогласованием является недопустимым.

При работе с индуктивным рассогласованием (частота работы инвертора больше собственной частоты нагрузочного контура) потери в выключаемых транзисторах снижаются со снижением коммутируемого тока. Включение другой пары транзисторов проходит без потерь.

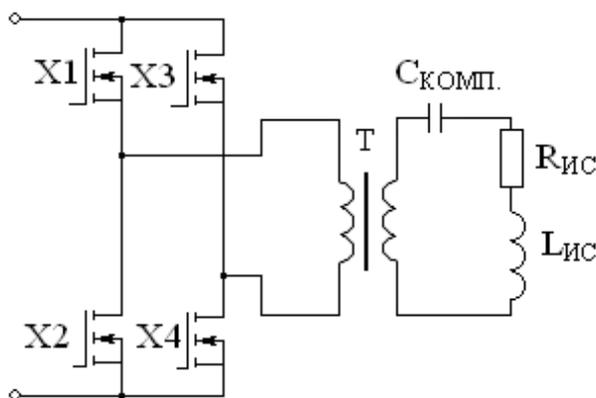


Рис 4. Инвертор напряжения с блоком согласования и индукционной системой

Для минимизации коммутационных потерь выключения необходимо минимизировать ток, протекающий через закрывающиеся силовые транзисторы в момент выключения. Через транзисторы протекают синусоидальные импульсы тока, так как выходной ток инвертора, сформированный колебательным нагрузочным контуром, по форме близок к синусоиде. Условие минимума тока коммутации выполняется, если полный

перезаряд собственных емкостей произойдет в момент перехода выходного тока инвертора через ноль.

Для оценки значения тока коммутации  $i_{ref(opt)}$ , соответствующего этому условию, рассмотрим кривую выходного тока инвертора (рис. 5).

Пусть момент времени  $t_1$  является оптимальным для выключения проводящих транзисторов, т.е. ампер-секундная площадь закрашенной фигуры ( $S_{ABC}$ ) равна заряду  $Q_{opt}$ , необходимому для полного перезаряда собственных емкостей транзисторов. Фигура ABC близка к треугольнику, поэтому

$$S_{ABC} \approx Q_{opt} \approx \frac{AB \cdot AC}{2} \approx \frac{i_{ref(opt)} \cdot \Delta t}{2}. \quad (1)$$

Решая выражение (1) относительно  $\Delta t$ , получим

$$\Delta t \approx \frac{2Q_{opt}}{i_{ref(opt)}}. \quad (2)$$

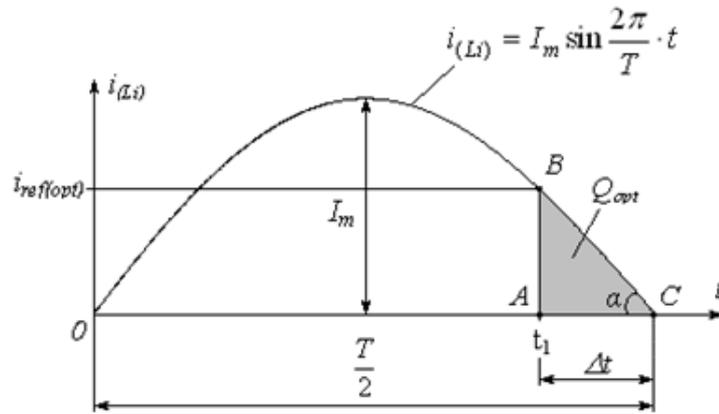


Рис. 5. Определение оптимального момента начала коммутации силовых транзисторов в инверторе напряжения

Тангенс угла  $\alpha$  можно определить следующими способами:

1. из треугольника ABC

$$tg\alpha \approx \frac{AB}{AC} \approx \frac{i_{ref(opt)}}{\Delta t}; \quad (3)$$

2. как производную функции  $i_{(Li)} = I_m \sin \frac{2\pi}{T} t$  в точке  $C = \frac{T}{2}$

$$\frac{di_{(Li)}}{dt} = tg(180 - \alpha) = -tg\alpha = \frac{I_m 2\pi}{T} \cos\left(\frac{2\pi}{T} \frac{T}{2}\right) = -\frac{2I_m \pi}{T}$$

т. е. 
$$tg\alpha = \frac{2I_m \pi}{T}. \quad (4)$$

Приравнявая выражения (3) и (4) получим

$$\frac{2I_m \pi}{T} \approx \frac{i_{ref(opt)}}{\Delta t}. \quad (5)$$

Подставим вместо  $\Delta t$  выражение (2), тогда

$$\frac{2I_m\pi}{T} \approx \frac{i_{ref(opt)}^2}{2Q_{opt}}. \quad (6)$$

Решая полученное уравнение относительно  $i_{ref(opt)}$  получим

$$i_{ref(opt)} \approx \sqrt{\frac{4\pi I_m Q_{opt}}{T}}. \quad (7)$$

Значение  $Q_{opt}$  определяется не только типом транзистора, но зависит также от температуры полупроводниковой структуры, тока и напряжения, т.е. может изменяться в некотором диапазоне. Ориентировочное значение данного параметра можно определить следующим образом:

$$Q_{opt} = \frac{I_m T}{2\pi} \cos \left( \frac{2\pi}{T} \left( \frac{T}{2\pi} \arccos \left( \frac{4\pi(C_{oss} - C_{rss})U}{I_m T} - 1 \right) - t_{d(off)} \right) \right) \quad (8)$$

где  $C_{oss}$ ,  $C_{rss}$ ,  $t_{d(off)}$  – паспортные данные силового ключа.

Для надежной работы инверторного моста с минимальными коммутационными потерями при изменяющихся параметрах нагрузки, характерных для технологий индукционного нагрева, необходимо учитывать изменение параметра  $Q_{opt}$  в процессе работы инвертора.

В предлагаемом адаптивном алгоритме самовозбуждения коммутация начинается с выключения проводящей пары транзисторов в момент снижения тока до уровня  $i_{ref(opt)}$ , который определяется по формуле (7). Включение другой пары транзисторов происходит после полного перезаряда собственных емкостей до или в момент перехода выходного тока инверторного моста через ноль. Определение оптимального тока коммутации  $i_{ref(opt)}$  осуществляется на каждом полупериоде выходного тока инвертора. Для учета изменяющихся условий работы силовых ключей в алгоритм управления введен блок адаптации, изменяющий параметр  $Q_{opt}$  в зависимости от качества коммутации транзисторов.

При работе инвертора на индукционную нагрузку система управления постоянно подстраивает частоту работы инвертора к частоте нагрузочного контура, обеспечивая оптимальное индуктивное рассогласование. При этом частота работы инвертора меняется в соответствии с изменением резонансной частоты нагрузочного контура, которое, в свою очередь обусловлено изменением параметров индукционной системы в ходе технологического процесса. Структурная схема блока согласующего управления на основе самовозбуждения, реализующий описанный принцип, представлен на рис. 6.

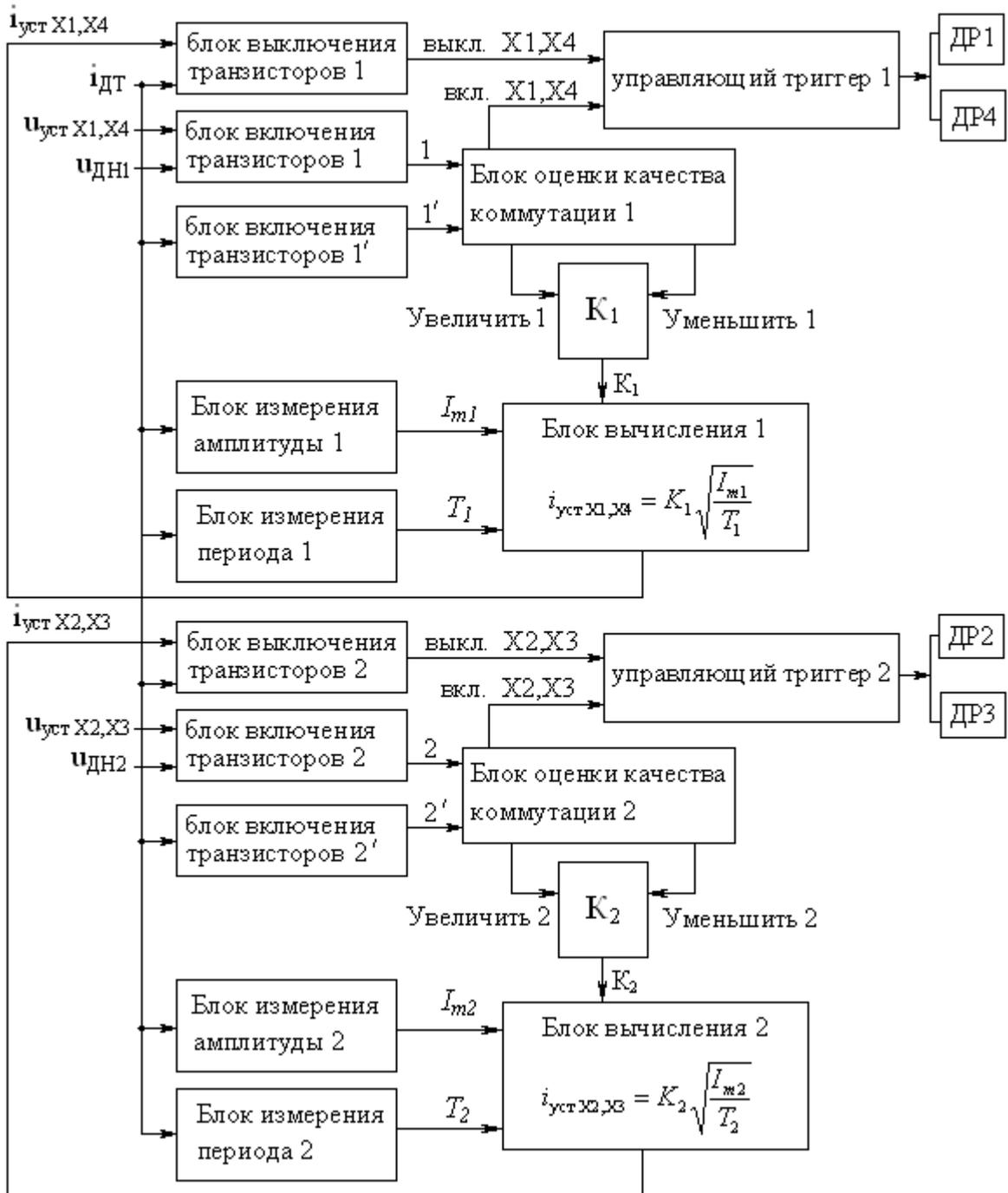


Рис. 6. Структурная схема блока согласующего управления

Адаптивный алгоритм согласующего управления на основе самовозбуждения

Сигнал с датчика тока  $i_{дт}$  поступает на блок выключения транзисторов и на формирователь уставки. Амплитуда  $I_{m1}$  и период  $T_1$  тока, протекающего через транзисторы X1, X4 фиксируются блоком измерения амплитуды 1 и блоком измерения периода 1 соответственно. Значения  $I_{m1}$  и  $T_1$  передаются на блок вычисления уставки 1. С момента перехода тока транзисторов через амплитудное значение на блок выключения транзисторов подается уставка  $i_{уст X1,X4}$ , вычисленная по формуле (7). При достижении током транзисторов значения  $i_{уст X1,X4}$  блок выключения транзисторов отключает управляющий

триггер 1, тем самым отключая силовые транзисторы X1, X4. С этого момента начинаются процессы закрытия полупроводниковой структуры силовых транзисторов и перезаряда их внутренних емкостей. Как только напряжение на транзисторах другой диагонали X2, X3 достигнет значения  $u_{уст\ X2,X3}$  блок включения транзисторов включает управляющий триггер 2, тем самым включая силовые транзисторы X2, X3. Амплитуда  $I_{m2}$  и период  $T_2$  тока, протекающего через транзисторы X2, X3 фиксируются блоком измерения амплитуды 2 и блоком измерения периода 2 соответственно. Значения  $I_{m2}$  и  $T_2$  передаются на блок вычисления уставки 2. С момента перехода тока транзисторов через амплитудное значение на блок выключения транзисторов подается уставка  $i_{уст\ X2,X3}$ , вычисленная по формуле (7). При достижении током транзисторов значения  $i_{уст\ X2,X3}$ , блок выключения транзисторов отключает управляющий триггер 2, тем самым отключая силовые транзисторы X2, X3. С этого момента начинаются процессы закрытия полупроводниковой структуры силовых транзисторов и перезаряда их внутренних емкостей. Как только напряжение на транзисторах другой диагонали X1, X4 достигает значения  $u_{уст\ X1,X4}$  блок включения транзисторов включает управляющий триггер 1, тем самым включая силовые транзисторы X1, X4 эти процессы повторяются каждый последующий период. Для реализации адаптивного блока введен дополнительный блок, который включает силовые транзисторы в момент перехода тока через ноль, в случае если процесс перезаряда емкостей незавершен и напряжение на включаемых транзисторах не достигло уставки.

Блок оценки качества коммутации определяет, как прошло включение транзисторов, по импульсу 1(2) или по импульсу 1'(2'). Если включение осуществилось по импульсу 1(2), то значит, процесс перезаряда емкостей полностью завершился до перехода тока нагрузки через ноль и, следовательно, можно еще приблизиться к резонансу, чтобы снизить потери выключения транзисторов. Для этого блок оценки качества коммутации увеличивает ширину импульса снижающего коэффициента K, что приводит к уменьшению уставки тока выключения и обеспечивает следующее выключение этих транзисторов с меньшими потерями. Если же включение транзисторов осуществилось по импульсу 1'(2'), значит, процесс перезаряда емкостей не завершился до перехода тока нагрузки через ноль, следовательно, необходимо отойти от резонанса, чтобы снизить потери включения транзисторов. При этом блок оценки качества коммутации выдает только сигнал на увеличение коэффициента K, что приводит к увеличению уставки тока отключения и обеспечивает снижение потерь включения этих транзисторов при следующей коммутации.

В третьей главе описана разработанная компьютерная модель комплекса индукционного нагрева с согласующим управлением на основе адаптивного алгоритма самовозбуждения. Расчетная схема показана на рис. 7.

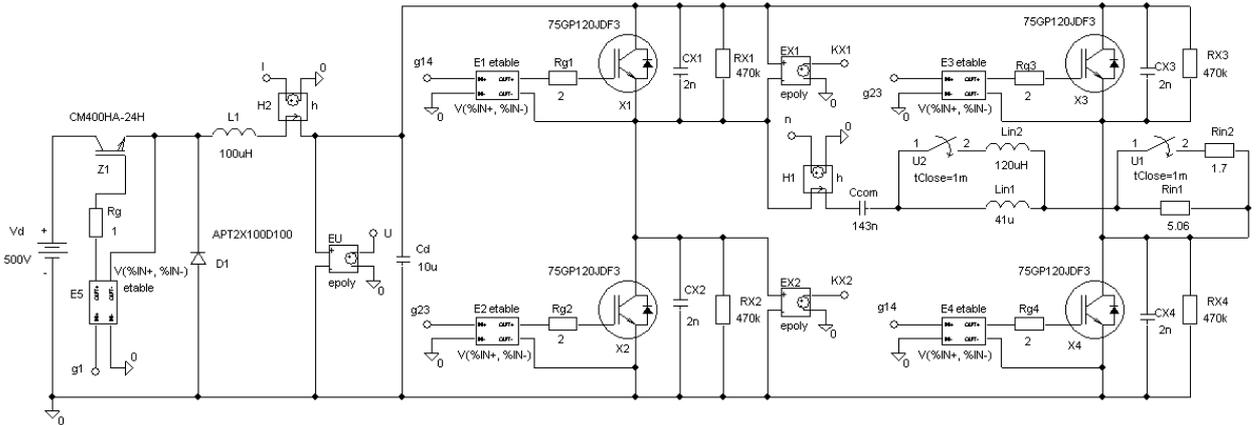


Рис. 7. Компьютерная модель комплекса индукционного нагрева

При разработке модели выпрямитель был заменен идеальным источником постоянного напряжения. Блок согласования и индукционная система заменены последовательным резонансным контуром, электрические параметры которого рассчитаны соответствующим образом. В модели предусмотрена возможность изменять параметры нагрузки в процессе расчета. Это позволяет моделировать режимы характерные для индукционного нагрева. Расчетная схема системы управления комплексом индукционного нагрева показана на рис. 8. Она включает в себя блок управления ШИМ регулятором с возможностью стабилизации выходной мощности, блоки измерения амплитуды и периода выходного тока инвертора, блок вычисления уставки тока выключения транзисторов, блок адаптации и формирователь импульсов согласующего управления на основе самовозбуждения.

На этой модели были исследованы следующие режимы работы комплекса: регулирование выходной мощности при постоянных параметрах нагрузки, стабилизация выходной мощности при изменении параметров нагрузки, характерных для технологий индукционного нагрева, изменение емкости компенсирующего конденсатора, которая может иметь место при необходимости вернуть работу нагревательного комплекса в допустимый частотный диапазон.

На рис.9 приведены временные диаграммы работы комплекса с частотным регулированием выходной мощности в режиме стабилизации при изменении активного и индуктивного сопротивления индукционной системы (а) и такие же диаграммы комплекса с согласующим управлением на основе самовозбуждения (б). При выходной мощности равной примерно 20 кВт в номинальном режиме КПД комплекса с частотным регулированием составляет 97,5%, а с согласующим управлением 98%. После изменения параметров нагрузки в момент времени  $t_1$  КПД комплекса с частотным регулированием снизился до 92%, КПД комплекса с согласующим управлением до 96,5%.

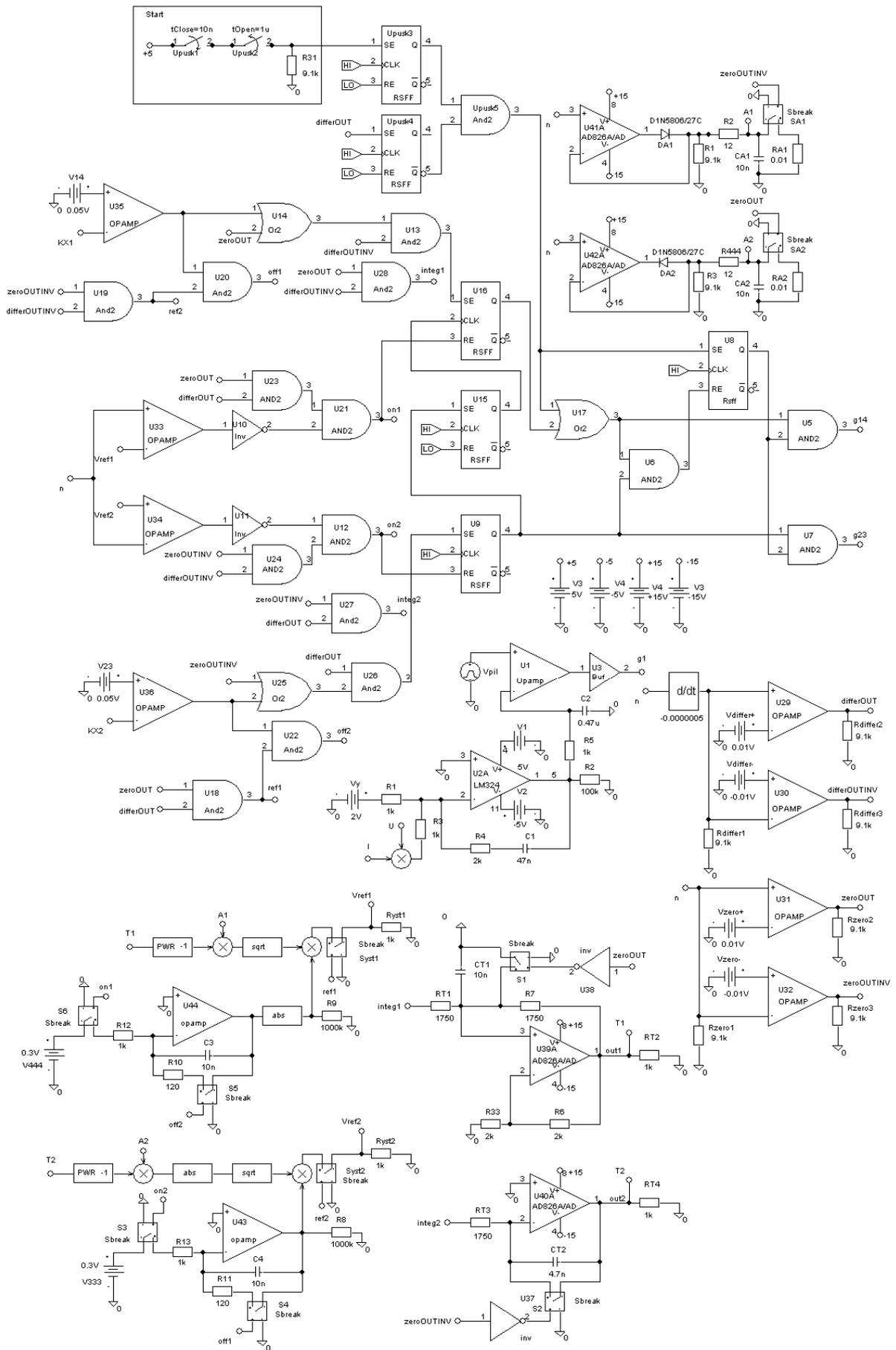


Рис. 8. Компьютерная модель СУ комплексом индукционного нагрева

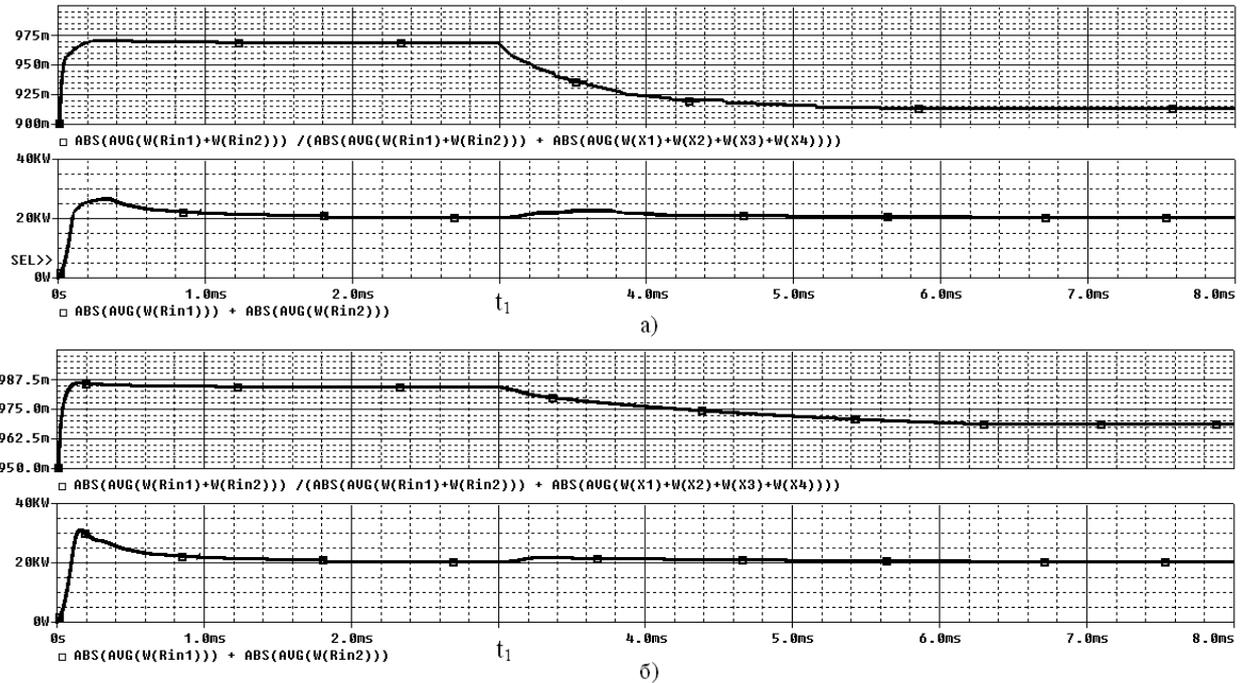


Рис. 9. Временные диаграммы выходной мощности и КПД комплекса с частотным регулированием (а) и комплекса с согласующим управлением (б)

Моделирование показало, что при частотном регулировании выходной мощности инвертора происходит увеличению коммутационных потерь в силовых транзисторах при отклонении от резонансного режима. Рост коммутационных потерь связан с увеличением тока, коммутируемого транзисторами. Это приводит к снижению КПД комплекса. Наиболее рациональной является структура с согласующим управлением и ШИМ регулированием выходной мощности. В такой структуре коммутационные потери всегда поддерживаются на минимальном уровне, ключи нагружены только активным током, так как вся реактивная мощность локализована в колебательном контуре, образованном индукционной системой и компенсирующим конденсатором.

В этой главе приведен также сравнительный анализ двух способов согласующего управления инвертором напряжения – предложенный адаптивный алгоритм самовозбуждения и фазовая автоподстройка частоты (ФАПЧ). Моделирование показало, что предложенный адаптивный алгоритм самовозбуждения обеспечивает большее быстродействие и меньший уровень коммутационных потерь в более широком частотном диапазоне, чем ФАПЧ.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию эффективности предложенного алгоритма управления инвертором, работающим в составе нагревательного комплекса. Исследования проводились на разработанном макете комплекса индукционного нагрева мощностью 100 кВт и частотой 44 кГц.

Плата системы управления, реализующая адаптивный алгоритм самовозбуждения транзисторного инвертора напряжения, приведена на рис.10. Блок формирования импульсов автоматической подстройки частоты

реализован с помощью аналоговых микросхем AD790 и программируемой интегральной логической схемы ALTERA EPM7064SLC84; блок вычислителя уставки собран на аналоговых микросхемах AD826 и AD633; блок адаптации выполнен на микросхемах AD826 и ADG411. На рис. 11 приведена осциллограмма, иллюстрирующая работу транзисторного инвертора напряжения.

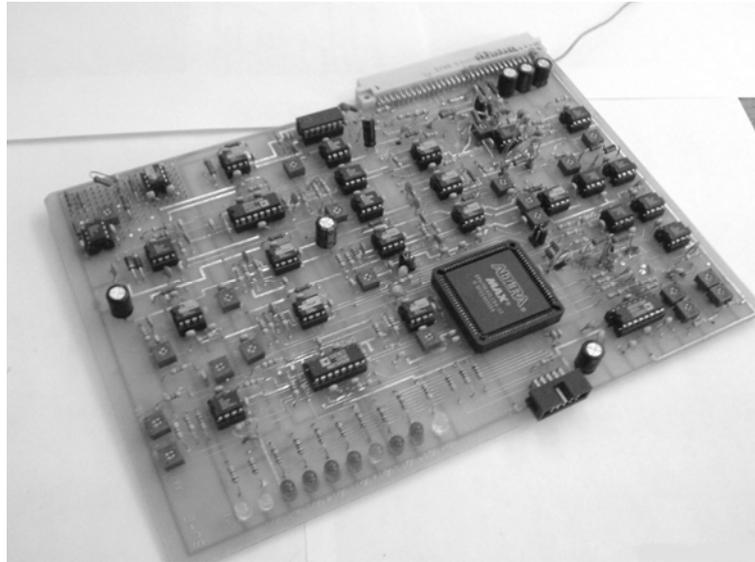


Рис. 10. Плата системы управления

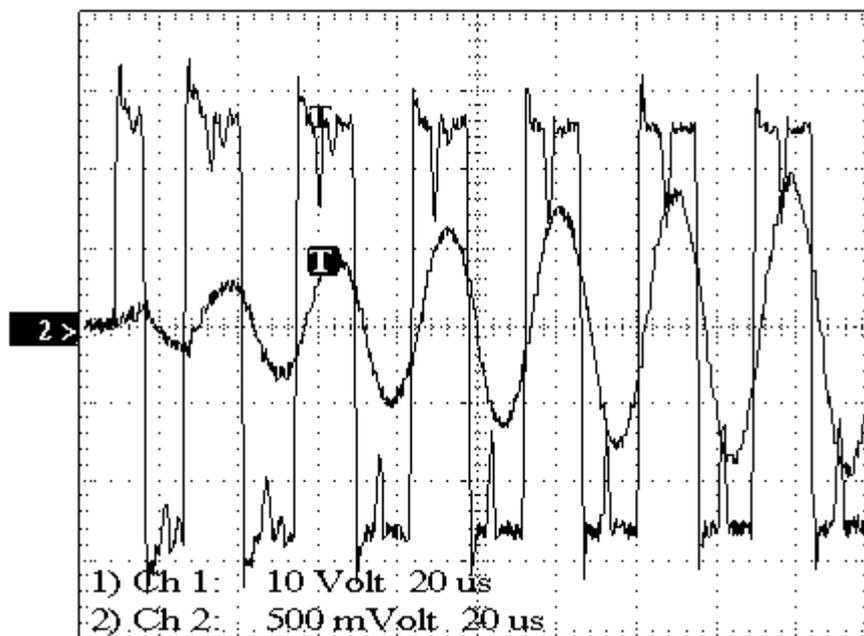


Рис. 11. Осциллограммы выходного тока и выходного напряжения при включении комплекса индукционного нагрева

Разработанная система управления обеспечивает быстрый выход на оптимальный режим при пуске и стабильную работу с минимальными потерями в режимах, характерных для индукционного нагрева.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана структура комплекса индукционного нагрева с блоком оптимального согласующего управления, который минимизирует обмен реактивной мощностью между элементами комплекса и поддерживает оптимальный режим высокочастотного преобразования при изменении параметров индукционной системы. Это позволяет существенно снизить себестоимость термообработки токами высокой частоты машиностроительных деталей за счет экономии электроэнергии и снижения установленной мощности оборудования.

2. Разработан адаптивный алгоритм оптимального согласующего управления комплексом индукционного нагрева, обеспечивающий повышение КПД при переменных параметрах индукционной системы. Алгоритм построен на основе самовозбуждения с адаптацией параметров к изменению режима работы нагревательного комплекса. Внедрение алгоритма позволит поднять предельную для современных транзисторов верхнюю границу частотного диапазона преобразователей, применяемых в составе комплексов индукционного нагрева, что даст большой экономический эффект при замене ламповых генераторов в промышленности.

3. Разработана компьютерная модель комплекса индукционного нагрева, учитывающая взаимосвязи всех элементов комплекса и влияние управляющих воздействий на энергетические показатели в различных динамических и установившихся режимах, характерных для индукционного нагрева. Выполнена настройка параметров нового алгоритма управления с учетом характерных особенностей конкретных технологий индукционного нагрева.

4. Разработана физическая модель комплекса индукционного нагрева мощностью 100 кВт, на котором выполнена экспериментальная оценка эффективности нового адаптивного алгоритма управления. Установлено, что потери в силовых транзисторах инвертора при реализации предложенного алгоритма снижаются в 1,8...2,3 раза. Физическая модель послужила прототипом разработанного фирмой «ИНТЕРМ» промышленного комплекса термообработки машиностроительных деталей токами высокой частоты.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации, входящие в перечень ВАК:

1. Тихомиров, И.С., Патанов, Д.А., Определение оптимального тока коммутации транзисторов инвертора напряжения в установках индукционного нагрева [Текст]/ И.С. Тихомиров, Д.А. Патанов // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – 2008 – №3 С. 188 – 192.

2. Тихомиров, И.С., Васильев, А.С., Патанов, Д.А., Адаптивный алгоритм самовозбуждения транзисторного инвертора напряжения для установок индукционного нагрева [Текст]/ И.С. Тихомиров, А.С. Васильев, Д.А. Патанов // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – 2008 – №8 С. 262 – 267.

Другие публикации:

3. Тихомиров, И.С., Дзлийев, С.В., Бондаренко, Д.Н., Патанов, Д.А., Чернецов, П.О., Автоподстройка частоты в транзисторных инверторах напряжения для индукционного нагрева [Текст]/ И.С. Тихомиров, С.В. Дзлийев, Д.Н. Бондаренко, Д.А. Патанов, П.О. Чернецов // Труды Всероссийской научно – технической конференции с международным участием, Екатеринбург 2006. – С. 337 – 341.

4. Tihomirov, I., Dzljev, S., Patanov, D., Bondarenko, D., Chernetsov, P., Ershov, D., High-frequency transistor converters for induction heating (Высокочастотные транзисторные преобразователи для индукционного нагрева) [Текст]/ I. Tihomirov, S. Dzljev, D. Patanov, D. Bondarenko, P. Chernetsov, D. Ershov // Proceedings of the International Seminar on Heating by Internal Sources, Padua, 2004. – P. 655 – 659.

5. Тихомиров, И.С., Чернецов, П.О., Транзисторные источники питания для плазменных установок [Текст]/ И.С. Тихомиров, П.О. Чернецов // Политехнический симпозиум 2004. СПб., 2004. – С. 61 – 62.

6. Тихомиров, И.С., Чернецов, П.О., Современный источник питания для электротехнологии с улучшенными энергетическими показателями [Текст]/ И.С. Тихомиров, П.О. Чернецов // Политехнический симпозиум 2004. СПб., 2004. – С. 54 – 55.

7. Тихомиров, И.С., Чернецов, П.О., Дзлийев, С.В., Патанов, Д.А., Исследование активного выпрямителя в составе источника питания для индукционного нагрева [Текст]/ И.С. Тихомиров, П.О. Чернецов, С.В. Дзлийев, Д.А. Патанов // Труды Всероссийской научно – технической конференции с международным участием, Екатеринбург 2006. – С. 333 – 336.

8. Тихомиров, И. С., Дзлийев, С.В., Ершов, Д.В., Фольварчук, А.С., Чернецов П.О., Технология и оборудование высокочастотного индукционного нагрева для горячей посадки и съема бандажей при ремонте турбогенераторов на электростанциях [Текст]/ И.С. Тихомиров, С.В. Дзлийев, Д.В. Ершов, А.С. Фольварчук, П.О. Чернецов // Сборник трудов международной научно – технической конференции, Минск 2005. – С. 24 – 25.